

Comparación de metodologías para la estimación de la densidad de la madera y sus implicancias en la estimación de parámetros genéticos en tres especies del género *Eucalyptus*

Alarcón, Pamela C.^{1,7}; María Elena Fernández²; Pablo Pathauer³; Leonel Harrand⁴; G. P. Javier Oberschelp⁴; Silvia Monteoliva⁵; Alejandro Martinez-Meier⁶

¹INTA, EEA Concordia, Entre Ríos. Becaria PICT 2013-1191; ²INTA, EEA Balcarce AER Tandil, Bs. As.; ³INTA, EEA Castelar, Bs. As.; ⁴INTA, EEA Concordia, Entre Ríos; ⁵INFIVE-CONICET. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata, Bs. As.; ⁶INTA, EEA Bariloche, Río Negro; ⁷alarcon.pamela@inta.gob.ar

Alarcón, Pamela C.; María Elena Fernández; Pablo Pathauer; Leonel Harrand; G. P. Javier Oberschelp; Silvia Monteoliva; Alejandro Martinez-Meier (2018) Comparación de metodologías para la estimación de la densidad de la madera y sus implicancias en la estimación de parámetros genéticos en tres especies del género *Eucalyptus*. Rev. Fac. Agron. Vol 117 (2): 175-183.

Entre las diversas características que definen la calidad de la madera, la densidad es el descriptor que ha cobrado mayor relevancia. En vista a la variedad de métodos disponibles para estimar la densidad básica, de la rapidez, confiabilidad y precisión de cada uno de ellos, los objetivos propuestos para este trabajo fueron: 1) comparar las determinaciones de densidad básica de la madera obtenidas por los métodos empírico, de máximo contenido de humedad y de balanza hidrostática en *Eucalyptus globulus*, *E. grandis* y *E. viminalis*, y 2) determinar si diferentes métodos de estimación de densidad básica brindan diferentes estimaciones de parámetros genéticos. Los resultados mostraron valores de densidad promedio entre 0,32-0,70 g/cm³, siendo el método empírico el que estimó los mayores valores promedios para las 3 especies, mostrando una tendencia a sobreestimar los valores de densidad. Las estimaciones de heredabilidades en sentido estricto para *E. globulus* mostraron diferencias entre los distintos métodos, siendo moderadas las diferencias para *E. viminalis* y *E. grandis*. Dadas las altas correlaciones fenotípicas estimadas entre los métodos de balanza hidrostática y de máximo contenido de humedad (r entre 0,85 y 0,99) y las complejidades inherentes a sus metodologías, el método de máximo contenido de humedad resultaría ser el más apropiado para las especies evaluadas de *Eucalyptus* dada su simplicidad respecto al método de balanza hidrostática.

Palabras clave: Densidad básica; mejoramiento genético; heredabilidad; correlación fenotípica

Alarcón, Pamela C.; María Elena Fernández; Pablo Pathauer; Leonel Harrand; G. P. Javier Oberschelp; Silvia Monteoliva; Alejandro Martinez-Meier (2018) Methodologies for the estimation of wood density and its implications in the estimation of genetic parameters in three species of the genus *Eucalyptus*. Rev. Fac. Agron. Vol 117 (2): 175-183.

Among the characteristics that define the quality of wood, density has become the more relevant trait. In relation to the different methods available to estimate the basic wood density, the quickness, reliability and precision of each one, the objectives of this work were 1) to compare wood density values estimated by the empirical, maximum moisture content and hydrostatic balance methods in *Eucalyptus globulus*, *E. grandis* and *E. viminalis*, and 2) to determine if the different methods provide different genetic parameters. The average wood density ranged between 0.32 to 0.70 g/cm³, providing the empirical method the highest average value for the 3 species, tending to overestimating wood density. Heritabilities for *E. globulus* showed differences between the three methods, being moderate for *E. viminalis* and *E. grandis*. Given the high correlations estimated between the hydrostatic balance and maximum moisture content methods (r between 0.85 and 0.99) and the complexities inherent in their methodologies, the maximum moisture content method would be the most appropriate for the evaluated species of *Eucalyptus*, given its simplicity with respect to the hydrostatic balance method.

Key words: Basic density; genetic improvement; heritability; phenotypic correlation.

Recibido: 08/06/2018

Aceptado: 08/10/2018

Disponible on line: 01/04/2019

ISSN 0041-8676 - ISSN (on line) 1669-9513, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP, Argentina

INTRODUCCION

Con el progreso de los programas de mejoramiento genético forestal se ha incrementado el rango de caracteres evaluados en las diferentes etapas. Inicialmente, éstos se enfocaban en el crecimiento temprano y la supervivencia por su influencia directa en el éxito de la población. Actualmente, persiguen objetivos económicos haciendo énfasis en propiedades de la madera que determinan la viabilidad económica de un rango de productos finales (Apialoza & Raymond, 2004).

Entre las diversas características que definen la calidad de la madera, la densidad es el descriptor que ha cobrado mayor relevancia, independientemente de si el objetivo es producción de madera sólida o pulpa (López et al., 2003, Harrand & López, 2007). La capacidad de evaluación de este carácter de manera rápida y sencilla ha llevado a los programas de mejoramiento genético a incorporar la densidad de la madera como un criterio de selección junto al crecimiento (Apialoza & Raymond, 2004). La densidad se define como la relación entre la masa y la unidad de volumen (Panshin & De Zeeuw, 1970). Muestra una amplia variación entre y dentro de especies, así como un alto determinismo genético (Zobel & Talbert, 1992). Dependiendo de la especie en cuestión, esta característica presenta una amplia variación entre árboles, aun cuando se consideran árboles de igual edad, clase de copa y crecimiento en condiciones comparables (Espina Lizana, 2006) e incluso dentro de un mismo árbol a nivel de anillo de una misma estación de crecimiento (Martínez Meier et al., 2008; 2009).

Los programas de mejoramiento requieren de la evaluación de un gran número de árboles siendo necesario, en ciertas circunstancias, la toma de muestras de manera no destructiva (Apialoza & Raymond, 2004). En este sentido, existen referencias que indican que la densidad promedio de un árbol puede ser descrita como una función del valor estimado en una muestra recolectada a la altura de 1,3 metros desde la base del tronco (Higa, 1963). La toma de muestras cilíndricas (tarugos) mediante el uso del barreno o taladro de Pressler es el método no destructivo más comúnmente usado (Raymond, 2002; Apialoza & Raymond, 2004). Dicha altura es operativamente la más empleada para tomar muestras de barreno.

Las metodologías tradicionales para la determinación de la densidad básica difieren unas de otras tomando relevancia la revisión de métodos que permitan la evaluación de la densidad de la madera en un gran número de árboles de manera no destructiva y a la vez, rápida y precisa.

Varios métodos permiten la estimación de la densidad a partir de muestras de tarugos. Estas técnicas incluyen desde el método de desplazamiento de agua basado en el antiguo principio de Arquímedes, o el método de máximo contenido de humedad (Smith, 1954 Foelkel et al, 1971), hasta métodos empíricos (Valencia & Varga, 1997) e inclusive métodos indirectos como la densitometría indirecta por rayos X (Polge, 1966; Arango & Tamayo, 2008; Tomazello et al., 2008;

Martínez Meier et al. 2008, 2009) y, más recientemente, la espectroscopía infrarroja cercana (NIRS) (Raymond et al., 2001, Labbe et al., 2013). Mientras que las técnicas tradicionales de estimación de densidad básica como son el método de desplazamiento de agua o de balanza hidrostática y el método de máximo contenido de humedad requieren de la saturación completa de la muestra en agua para luego ser llevadas a peso anhidro, el método empírico presenta el inconveniente de que el tamaño de los tarugos es relativamente pequeño como para realizar estimaciones precisas del volumen (Valencia & Vargas, 1997). Considerando a la muestra como un cilindro perfecto, este método emplea una fórmula para obtener el volumen verde de la muestra sin necesidad de emplear el desplazamiento del agua ni llevar a saturación completa a las muestras de barreno representando un ahorro considerable de tiempo cuando se procesa una gran cantidad de muestras.

En vista a la variedad de métodos disponibles para estimar la densidad básica y de la rapidez, confiabilidad y precisión de cada uno de ellos, los objetivos propuestos para este trabajo fueron: 1) comparar las determinaciones de densidad básica de la madera obtenidas por los métodos empírico, de máximo contenido de humedad y de balanza hidrostática en distintas especies del género *Eucalyptus*: *E. globulus*, *E. grandis* y *E. viminalis* y, 2) determinar si diferentes métodos de estimación de densidad básica influyen sobre las estimaciones de heredabilidad y coeficiente de variación genética.

METODOLOGIA

Sitios de muestreo

Muestras de madera (tarugos) de árboles de *E. globulus*, *E. grandis* y *E. viminalis* fueron recolectados en diferentes dispositivos experimentales que forman parte de los programas de mejoramiento genético del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) de Argentina. En el caso de *E. globulus* y *E. viminalis*, consisten en ensayos de progenies y procedencias instalados entre los años 1995 y 2000 en la región pampeana, mientras que en el caso de *E. grandis* comprenden ensayos clonales instalados entre los años 2008 y 2010 en la región mesopotámica (Tabla 1).

Muestras

Tarugos de 5 mm de diámetro fueron recolectados con barreno de Pressler a 1,30 metros desde la base e inmediatamente colocados en placas ranuradas de policarbonato alveolar. Se realizó una doble identificación de las muestras (sobre el tarugo y sobre la placa de policarbonato) para asegurar una correcta trazabilidad. Los tarugos fueron tomados de manera perpendicular al eje principal del árbol, de lado a lado cuando el diámetro del árbol era inferior al largo del taladro, en dirección oeste-este, salvo en los casos donde se debió evitar la presencia de madera de reacción. En la Tabla 2 se indican las familias/clones muestreados en cada especie, así como las procedencias de los mismos y el número de árboles muestreados.

Tabla 1. Detalle de los sitios de muestreo.

Especie	<i>E.globulus</i>	<i>E. grandis</i>	<i>E. viminalis</i>		
Ensayo	BALC	CONC	CAAC	GUAM	VALL
Localización	Balcarce, Buenos Aires	Concordia, Entre Ríos	GeneralPaz, Corrientes	Guaminí, Buenos Aires	Del Valle, Buenos Aires
Latitud	37°49'00"S	31°22'22"S	27°47'04"S	37°6'42"S	35°51'88"S
Longitud	58°15'00"O	58°07'04"O	57°41'06"O	62°26'70"O	60°43'64"O
Suelo	Argiudol Petrocálcico típico	Arenoso	Franco-arcillo- arenoso	Franco-arcilloso	Arenoso
^a PMA	911,9	1429,1	1279,7	735,6	959,9
^a TMA	14,5	19,2	21,7	13,8	16,9
^a TMinAbs	-5,7	-4,8	-1,1	-13,5	-7,9
Plantación	1995	2008	2010	1998	2000

Tabla 2. Especie, procedencias, número de familias/clones e individuos muestreados.

Especie	Procedencias	Familias/clones	Individuos
<i>E.globulus</i>	Flinders_Island_TAS	5	27
	Jeeralang, VIC	9	62
	Otways State Forest, VIC	9	44
<i>E. grandis</i>	Concordia, ER	15	89
	Ring Tail SF, QLD	4	23
	Wallingat SF,NGS	3	22
	Kendall_NSW	3	26
<i>E.viminalis</i>	Argentina, BsAs	10	113
	Bald Hills,VIC	13	120
	Bonang, VIC	7	62
	Errinundra Road,VIC	7	52
	Federation Road,VIC	9	94

Métodos evaluados para la determinación de la densidad básica

Método de la balanza hidrostática (MBH)

Este método se basa en el principio de Arquímedes de desplazamiento de agua para realizar la estimación del volumen de la muestra. Inicialmente, las muestras son llevadas a su punto de saturación en agua y luego pesadas. La saturación se realizó con la ayuda de un compresor, el cual permitió la saturación de las muestras en 24 horas. Para obtener el volumen por desplazamiento de agua se utilizó un kit de densidad adaptado sobre una balanza analítica con precisión de 0.0001 g lo que permite disminuir los errores en los sucesivos pesajes. Se procedió a tomar el peso de la muestra sin sumergir (P) y el peso sumergido (Ps). El volumen de la muestra (V), que corresponde al peso del agua desplazada, se estimó mediante la siguiente fórmula:

$$V = (P - Ps) / da$$

Donde: da= densidad del agua (1g/cm³).

Las muestras fueron llevadas a estufa a 105 – 110 C° durante 24 horas para después obtener el peso anhidro (Pa). La densidad básica (Db) expresada en g/cm³ se estimó como la relación entre Pa y V según la siguiente fórmula:

$$Db = Pa/V$$

Método empírico (ME)

En este caso, cada tarugo se consideró como un cilindro perfecto (Valencia & Vargas, 1997). Se midió la longitud total del tarugo utilizando una regla graduada con aproximación a milímetros. Con los valores de longitud y del diámetro interior del taladro (5 mm) se obtuvo el Volumen en verde (Vv) de cada muestra empleando la siguiente fórmula:

$$Vv = (\pi * D^2 * L)/4$$

Donde: π = 3,1416, D = diámetro interior del cilindro del taladro Pressler (0,5 cm) y L = longitud del tarugo (cm)

El peso anhidro (Po) de las muestras se obtuvo con una balanza analítica después de permanecer en estufa a 105-110 °C durante 24 horas. Con los datos de Po y Vv se obtuvo el valor de Db (g/cm³), según la fórmula:

$$Db = Po/Vv$$

Método de máximo contenido de humedad (MMCH)

Este método corresponde al propuesto por Smith (1954) adaptado posteriormente por Foelkel et al. (1971; 1983) para muestras pequeñas e irregulares de madera del género *Eucalyptus* (Arango et al., 2001). En este caso, tanto el peso a saturación (Pt) como el Peso anhidro (Pa) de las muestras se obtuvieron de la misma manera que para MBH. La fórmula utilizada para obtener la Db (g/cm³) con este método fue la siguiente:

$$Db = 1 / [(Pt/Pa) - 0,346]$$

Donde: Pt= peso saturado; Pa: peso anhidro

Análisis de datos

El coeficiente de correlación de Pearson (*r*) entre métodos fue estimado a nivel individual y de media de tratamientos (familias y/o clones) para cada una de las especies estudiadas.

Los componentes de varianza, empleados para las estimaciones de heredabilidad, se obtuvieron por el método de máxima verosimilitud restringida (REML). Un modelo lineal mixto fue empleado considerando fijos a los efectos de sitios para *E. grandis* y *E. viminalis* (dos sitios de muestreo cada uno) y procedencias, y aleatorio el efecto de familias/clones anidados en procedencias como así también el efecto de las interacciones sitio por familia/clon y el error experimental.

El modelo empleado para *E. grandis* y *E. viminalis* fue el siguiente:

$$Y_{ijkl} = \mu + \beta_l + \alpha_k + g_{l(k)} + \beta g_{l(k)} + e_{ijkl}$$

donde: Y_{ijkl} es la densidad observada en el *i*-ésimo árbol de la *j*-ésima familia/clon anidada dentro de la *k*-ésima procedencia en el *l*-ésimo sitio, μ es la media poblacional; β_l es el efecto fijo de sitio, α_k es el efecto fijo de la *k*-ésima procedencia; $g_{l(k)}$ es el efecto aleatorio de la *j*-ésima familia/clon anidada en la *k*-ésima procedencia; $\beta g_{l(k)}$ es el efecto aleatorio de interacción sitio por familia/clon anidado en procedencia y e_{ijkl} es el error aleatorio.

El modelo empleado para *E. globulus* fue el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_k + g_{l(k)} + \varepsilon_{ij}$$

donde Y_{ijk} es la densidad observada en el *i*-ésimo árbol de la *j*-ésima familia anidada dentro de la *k*-ésima procedencia; μ es la media poblacional, α_k es el efecto fijo de la *k*-ésima procedencia, $g_{l(k)}$ el efecto aleatorio de la *j*-ésima familia anidada en la *k*-ésima procedencia y ε_{ij} es el error aleatorio.

Con los componentes de varianza estimados, en los casos de *E. globulus* y *E. viminalis*, se calculó la

heredabilidad en sentido estricto (h^2) donde la varianza genética aditiva se calculó como 3 veces la varianza de familias, considerando un posible efecto de parentesco y de presencia de hermanos completos dentro de las familias de polinización abierta con un coeficiente de correlación entre hermanos de 0,33 (Squillante, 1974; Hodge et al., 1996; Dutkowski et al., 2004; Marcó & White, 2002):

E. globulus

$$h^2 = 3 \cdot \sigma_f^2 / (\sigma_f^2 + \sigma_{sf}^2 + \sigma_e^2)$$

E. viminalis

$$h^2 = 3 \cdot \sigma_f^2 / (\sigma_f^2 + \sigma_{sf}^2 + \sigma_e^2)$$

Donde: σ_f^2 es la varianza de familias anidadas en procedencias; σ_{sf}^2 es la varianza de la interacción sitio por familia anidada en procedencia y σ_e^2 es la varianza residual.

En el caso de *E. grandis*, se estimó la heredabilidad en sentido amplio (H^2):

$$H^2 = \sigma_c^2 / (\sigma_c^2 + \sigma_{sc}^2 + \sigma_e^2)$$

Donde: σ_c^2 es la varianza clonal; σ_{sc}^2 es la varianza de la interacción sitio por clon anidado en procedencia y σ_e^2 es la varianza residual.

El error estándar de la heredabilidad se estimó con la siguiente fórmula propuesta por Falconer & Mackay (1996):

$$es(h^2) = \sqrt{[2 \cdot (1-t)^2 \cdot (1+(n-1)t)^2 / n(n-1)(j-1)]}$$

Donde n: media armónica de árboles por familia/clon, j: número de familias/clones y t: h^2 .

En el caso de *E. globulus* y *E. viminalis* se estimaron los coeficientes de variación genética aditiva (CV_{GA}) según la siguiente fórmula:

$$CV_{GA} = 100 \cdot \left(\frac{\sigma_F}{x} \right)$$

Donde σ_F : desvío estándar genético aditivo y x: media familiar.

Todos los análisis fueron realizados con el software R (R Development Core Team, 2015). El paquete lmer fue usado para la estimación de los componentes de varianza y la función cor.test para la estimación de las correlaciones entre métodos.

RESULTADOS

Las correlaciones fenotípicas, tanto a nivel individual como de media de tratamientos, entre métodos resultaron altas y significativas ($p < 0,001$) en todos los casos y especies evaluadas, variando desde r: 0,62 a 0,99 a nivel individual y desde r: 0,79 a 0,99 a nivel de familias y clones (Tabla 3, Figura 1). Las correlaciones más altas a nivel individual fueron establecidas entre los métodos MBH y MMCH, con valores de r: 0,85; r: 0,98 y r: 0,99 para *E. globulus*, *E. grandis* y *E. viminalis*, respectivamente (Tabla 3). Las siguientes figuras ilustran las relaciones entre los métodos, tanto a nivel individual como a nivel de tratamientos para cada una de las especies.

Tabla 3. Correlaciones (r) a nivel individual y de media de tratamientos (superior e inferior respectivamente) entre pares de métodos para las tres especies estudiadas.

Método	Especies		
	<i>E. globulus</i>	<i>E. grandis</i>	<i>E. viminalis</i>
MBH - ME	0,62	0,92	0,97
	0,79	0,97	0,96
ME - MMCH	0,65	0,92	0,97
	0,81	0,97	0,96
MMCH - MBH	0,85	0,98	0,99
	0,95	0,99	0,99

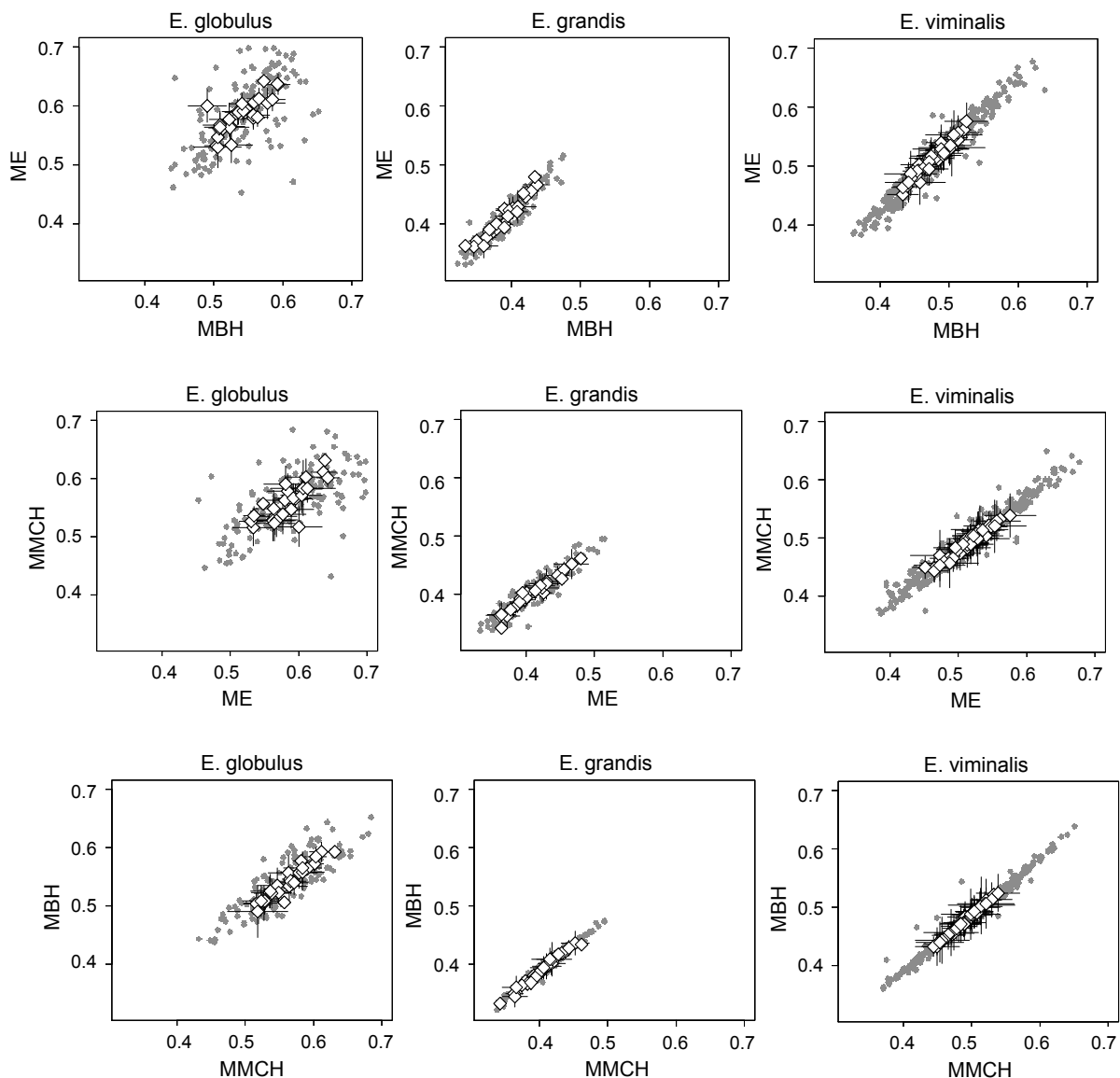


Figura 1. Gráficos de dispersión entre métodos por especie. Los puntos grises muestran las relaciones a nivel individual, mientras que los diamantes blancos, los valores promedios de cada una de las familias (*E. globulus* y *E. viminalis*) y clones (*E. grandis*). Las líneas de color negro representan los valores de los desvíos estándares.

Los valores de estadística descriptiva de la densidad básica según el método para cada una de las especies son presentados en la Tabla 4 junto con los valores de heredabilidades, error estándar de la heredabilidad y el coeficiente de variación genética aditiva.

La densidad de la madera varió entre 0,32 y 0,70 g/cm³, estimándose los mayores valores por parte del ME para las 3 especies.

Las estimaciones de heredabilidad fueron muy similares entre métodos en el caso de *E. grandis*, mientras que se observaron diferencias para el caso de *E. viminalis* y *E. globulus*, siendo superiores los valores estimados por MBH y MMCH para *E. globulus* y MBH para *E. viminalis*.

Los tres métodos evidenciaron diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) entre procedencias para *E. globulus* y entre sitios para *E. viminalis*, mientras que no se encontraron diferencias significativas entre sitios ni entre procedencias para *E. grandis*.

DISCUSION

La evaluación de la relación costo-beneficio de los métodos de muestreo como de medición directa de características de calidad de la madera, toma mayor relevancia al considerar la evaluación a gran escala de varios ensayos genéticos en el marco de un programa de mejoramiento genético (Apialoza & Raymond, 2004; Toval Hernández, 2008).

En este trabajo, las comparaciones de estimaciones de densidades realizadas por los métodos de balanza hidrostática (MBH), método empírico (ME) y de máximo contenido de humedad (MMCH) se encuentran dentro de los rangos de valores publicados para cada una de las especies evaluadas. Así, en *E. globulus* se estimaron valores medios de densidad entre 0,54 y 0,59 g/cm³ dentro del rango publicado para la especie de 0,49-0,59 g/cm³ (Igartua & Monteoliva, 2006; Poke et al. 2006; Moreno & Igartua, 2015). Para *E. grandis*, los valores promedios de densidad estimadas estuvieron entre 0,39 y 0,42 g/cm³, siendo los valores reportados para la misma 0,38 - 0,55 g/cm³ según Arango et al. (2001) y 0,43-0,49 g/cm³ según Harrand & López(2007). Para *E. viminalis*, la densidad promedio estuvo entre 0,48 y 0,52 g/cm³, similar a los valores reportados para esta especie entre 0,40 - 0,57 g/cm³

(Otegbeye & Kellison, 1980; Pathauer, 2005) pero inferior a 0,67 g/cm³ reportado por Monteoliva et al. (2015).

La anatomía compleja dentro del género *Eucalyptus* sumada a la variación ambiental en los sitios de implantación de cada una de las especies permitirían explicar las variaciones de densidad a nivel interespecífico. Con respecto al primer aspecto, existen diferencias anatómicas tanto a nivel de fibras (morfometría de fibras), como de vasos (diámetro y número de vasos) y área de pared celular entre las especies estudiadas (Zanne et al., 2009; Monteoliva et al. 2015, Barotto et al. 2017). Para estas tres especies se demostró a nivel de fuste que la cantidad de fibras por área (medida indirectamente por el ancho de las fibras) y los vasos son las variables que se relacionan negativamente con la densidad de la madera, considerándose a esta última como una variable integradora de la fracción de lúmenes dada por los vasos, como por la morfometría de fibras y porcentajes de los distintos tejidos (Monteoliva et al. 2017).

Entre métodos, se mantuvo la tendencia de mayores estimaciones de densidades por parte de ME, seguido de MMCH, estimándose los valores más bajos por MBH. Las correlaciones fenotípicas entre métodos fueron incrementando en sentido ME/MBH, ME/MMCH y MBH/MMCH, tomando valores altos para *E. grandis* y *E. viminalis* (r : 0,90 a 0,99) y moderado a alto para *E. globulus* (r : 0,63 a 0,85). Esta menor correlación entre métodos en la última especie podría ser responsable de las diferencias observadas en los parámetros genéticos estimados.

Las tendencias observadas en este estudio no se vieron igualmente manifestadas en el trabajo de Valencia (1994) y Valencia & Vargas(1997) en *Pinus patula* y *P. greggii*, donde básicamente no se detectaron diferencias entre los valores estimados por estos tres métodos, estimándose correlaciones cercanas a la unidad y concluyendo en la confiabilidad de emplear el método empírico para las estimaciones de densidad considerando la sencillez y rapidez de su metodología. Similares resultados obtuvieron Rojas & Villers (2005) en *P. hartwegii* comparando ME y MMCH. Queda aún por dilucidar si la diferencia obtenida en el presente estudio entre métodos tiene alguna relación con las características propias de la madera de esta especie latifoliada, en contraste con la madera de coníferas estudiadas en los otros casos.

Tabla 4. Valores promedio, desvío estándar (DE), mínimo, máximo y coeficiente de variación (cv), junto a los valores de heredabilidad en sentido estricto (h^2), amplio (H^2), error estándar de la heredabilidad (ee) y media armónica del número de individuos por familia/clon (ma).

	<i>E. globulus</i>			<i>E. grandis</i>			<i>E. viminalis</i>		
	MBH	ME	MMCH	MBH	ME	MMCH	MBH	ME	MMCH
promedio	0,54	0,59	0,56	0,39	0,42	0,41	0,48	0,52	0,49
DE	0,05	0,06	0,05	0,03	0,04	0,04	0,05	0,06	0,05
mínimo	0,44	0,45	0,43	0,32	0,34	0,33	0,36	0,38	0,37
máximo	0,65	0,70	0,68	0,48	0,52	0,52	0,64	0,68	0,65
cv (%)	8,6	10	9,2	8,4	9,6	8,7	10,5	11,2	10,6
$h^2 - H^2$	0,45	0,20	0,36	0,12	0,16	0,15	0,30	0,26	0,23
ee $h^2 - H^2$	0,11	0,11	0,11	0,08	0,08	0,08	0,06	0,05	0,05
CV _{GA}	6,40	5,10	6,24				5,69	5,54	5,06
ma	4	4	4	6	6	6	11	11	11

En *Eucalyptus*, Arango et al. (2001) compararon las estimaciones de densidad obtenidas por los métodos MBH y MMCH en clones de *E. grandis*, encontrando una subestimación del 3% por parte del MMCH con respecto a los valores estimados por MBH. En nuestro caso sucedió lo contrario, hallamos una subestimación del 2% (*E. globulus* y *E. grandis*) y 1% (*E. viminalis*) en los valores de densidad básica estimados por MBH en relación a los estimados por MMCH. Más allá de estas diferencias, las altas correlaciones estimadas entre los métodos MBH-MMCH (r entre 0,85 y 0,99) para las tres especies coinciden con lo encontrado por Arango et al. (2001) en *E. grandis*. Así, se podría confiar en las estimaciones realizadas por cualquiera de estos dos métodos considerando que estas estimaciones son más conservadoras que las realizadas por el ME, que tiende a sobreestimar los valores de densidad para las especies de *Eucalyptus* evaluadas.

Las estimaciones de heredabilidad en sentido estricto (h^2) realizadas para *E. globulus* mostraron diferencias entre los distintos métodos, pero coinciden en que existe un determinismo genético moderado de la densidad básica (h^2 entre 0,20 y 0,45). Los valores de h^2 publicados para la densidad básica de *E. globulus* son muy variables. Raymond (2002) reporta valores entre 0,67 y 1 cuando se evalúan varias procedencias diferentes. Por su parte, Downes et al. (1997) obtuvieron valores entre 0,22 y 0,78 en un estudio realizado en Australia, mientras que Espina Lizana (2006) indicó valores de entre 0,04 y 0,37 para dos sitios evaluados en Chile.

En el caso de *E. grandis* y *E. viminalis*, las estimaciones de heredabilidad por los distintos métodos fueron similares evidenciando un determinismo genético bajo para *E. grandis* (h^2 entre 0,12 y 0,16) y medio para *E. viminalis* (h^2 entre 0,23 y 0,30).

En cuanto a la precisión de las estimaciones de densidad básica, existen evidencias de que la densidad promedio de todo un árbol puede ser ligeramente inferior que la estimada a partir de una muestra cilíndrica recolectada a 1,3 metros (Ladrach, 1984; Barrichelo y Brito, 1984). En clones de *E. grandis*, Arango et al. (2001) hallaron un decrecimiento de la densidad de la madera desde la base del árbol hasta la altura de pecho, para luego incrementarse hacia la copa hasta el 75% de la altura total del árbol. Estos autores hallaron una subestimación del 6,25% de la densidad básica media estimada desde muestras de barreno tomadas a 1,3 metros en comparación con la estimada a partir de rodajas obtenidas a la misma altura. Por su parte, Charria et al. (2014) empleando el método de desplazamiento de agua en muestras de *E. pellita*, encontraron una densidad estimada a partir de tarugos un 10% menor que la estimada a partir de rodajas. En clones de *E. globulus*, Labbe et al. (2013) analizaron tarugos con espectroscopía de infrarrojo cercano (NIRS) y obtuvieron distintos perfiles de variación de la densidad de la madera en el sentido de la altura de los árboles. Esto último implicaría que clones con densidades similares a la altura de pecho pueden tener diferencias significativas en su densidad promedio a nivel del fuste. En gran parte, esto se debe a que la medición de densidad en tarugos por los métodos tradicionales implica el manejo de pequeños volúmenes irregulares, lo que puede conferir una fuente

de error experimental significativa (Charria et al., 2014). Esto pone en evidencia que las fuentes de variación pueden atribuirse a un sinnúmero de factores no considerados en modelos simples, lo cual resalta la necesidad de emplear métodos confiables para la estimación de la densidad básica de la madera. En este sentido, el ME fue el método de mayor error estándar y coeficiente de variación fenotípica, lo cual no se tradujo en una mayor estimación del determinismo genético de la densidad de la madera.

CONCLUSIONES

Considerando las comparaciones de las estimaciones de densidad básica y heredabilidades realizadas por los distintos métodos y las complejidades inherentes a sus metodologías, el método de máximo contenido de humedad resultaría ser el más apropiado para las especies evaluadas de *Eucalyptus* ya que realiza estimaciones confiables dentro de los rangos esperados para las distintas especies, simplificando su metodología con respecto al método de balanza hidrostática (o de desplazamiento de agua) con el que a su vez muestra alta correlación.

El método empírico no sería el más apropiado para realizar estimaciones precisas en estas especies de latifoliadas ya que, a diferencia de lo reportado para coníferas, tiende a sobrestimar los valores de densidad básica.

Agradecimientos

Agradecemos al INRA (Orleans, Francia), especialmente a Phillipe Rozenberg y Frederic Miller, y a Iris Figueredo de INTA EEA Montecarlo (Misiones) por su colaboración para la realización de este trabajo desarrollado en el marco del proyecto de Cooperación Internacional TOPWOOD (Proyecto de colaboración internacional MSCA-RISE-2014 Horizon 2020 de la Comunidad Europea "Tools for Phenotyping WOOD") cofinanciado por el INTA (PNFOR 1104073) y el PICT 2013-01191 (FONCyT-MINCYT).

BIBLIOGRAFIA

- Apialoza, L.A. & C. Raymond. 2004. Genetic variation of physical and chemical wood properties of *Eucalyptus globulus*. *Silvae Genetica* (54)-4/5: 160-166.
- Arango, B. & L. Tamayo. 2008. Densidad de la madera en clones de *Eucalyptus* por densitometría de rayos X. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia* dos sitios en Chile. Tesis de grado. Universidad Austral de Chile.
- Arango, B., J.F. Hoyos & A. M. Vásquez. 2001. Variación de la densidad básica de la madera de *Eucalyptus grandis* en arboles de siete años de edad. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín* 54: 1275-1284.
- Barotto, A. J., S. Monteoliva, J. Gyenge, A. Martínez-Meier, K. Moreno, N. Tesón & M.E. Fernández. 2017. Wood density and anatomy of three *Eucalyptus* species: implications for hydraulic conductivity. *Forest Systems*

- 26 (1). Disponible en: <https://doi.org/10.5424/fs/2017261-10446>
- Barrichelo, L.E. & J.O. Brito.** 1984. Variabilidade longitudinal e radial da madeira de *Eucalyptus grandis*. En: XVII Congresso anual de celulose e papel. Sao Paulo 403- 409.
- Charria, D.L., V.M. Nieto Rodríguez, M. Sarmiento & N. Borralho.** 2014. Estimación indirecta de la densidad de la madera mediante el uso de pilodyn en la selección de clones de eucalyptus pellita f. Muell. Colombia Forestal Vol. 17(2) 181- 192.
- Downes, G.M., I. Hudson, C.A. Raymond, G.H. Dean, A.J. Michell, L.R. Schimleck, R. Evans & A. Muneri.** 1997. Sampling plantation eucalypts for wood and fibre properties, CSIRO Publishing, Melbourne, Australia.
- Dutkowski, G.W., A.R. Gilmour & N.M.G. Borralho.** 2004. Modification of the additive relationshipmatrix for open pollinated trials. En: IUFRO International Symposium on Developing the Eucalypt of the Future. Valdivia, Chile, September 10-15 2001.
- Espina Lizana, A.I.** 2006. Densidad básica de la madera de *Eucalyptus globulus* em dos sitios en Chile. Tesis de grado. Universidad Austral de Chile. 50 páginas.
- Falconer, D.S. & T.F. Mackay.** 1996. Introduction to Quantitative Genetics, fourth ed. Longmans Green. Harlow, Essex, UK.
- Foelkel, C. E., M. A. Brasil & L. E. Barrichelo.** 1971. Métodos para determinação da densidade básica de Cavacos para coníferas e folhosas. IPEF (2/3): 65-74.
- Foelkel, C.E., A.F. Milanez & C.A. Busnardo.** 1983. Método do máximo teor de umidade aplicado á determinacao de densidad básica da madeira do eucalipto. En: 4º Congreso Forestal Brasileiro. Sao Paulo: El Congreso: 792- 796.
- Harrand L. & J.A. López.** 2007. El pilodyn en el mejoramiento genético de la densidad de la madera. Xxii jornadas forestales de Entre Ríos. Concordia (Entre Ríos). Cd rom.
- Higa, A.T.** 1963. Variacao de densidade basica de madeira de *Pinus elliottii* var. *elliottii* e *P. taeda*. IPEF-Brasil 7:79-91.
- Hodge, G.R., P. W. Volker, R.M. Potts & J.V. Owen.** 1996. A comparison of genetic information from openpollinated and control-pollinated progeny tests in two eucalypts species, Theoretical and Applied Genetic: 92: 53- 63.
- Igartúa, D. V. & S. Monteoliva.** 2006. *Eucalyptus globulus* en Argentina: potencialidad del sudeste de la provincia de Buenos Aires para la producción de materia prima fibrosa. En IV Congreso Iberoamericano de Investigación en Celulosa y Papel. 23 al 27 de octubre de 2006. Santiago y Valdivia, Chile. Trabajo en actas. Cd rom.
- Labbe, R., B. Droppelmann & C. Balocchi.** 2013. Variation in wood density and pulp yield in *Eucalyptus globulus* clones evaluated with near infrared spectroscopy. Bosque 34(3): 263-272.
- Ladrach, W.E.** 1984. Calidad de madera de *Pinus patula* Schl. et Cham. Informe de Investigación No. 92. Smurfit Cartón de Colombia Invest. Forestal. Cali, Colombia. 23 páginas.
- López, J., L. Parisi & L. Harrand.** 2003. Densidad de la madera de tres huertos semilleros de progenies de *Eucalyptus grandis*. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/leonel_harrand/publication/237512053_densidad_de_la_madera_de_3_huertos_semilleros_de_progenies_de_eucalyptus_grandis/links/548a0d1e0cf225bf669c7915/densidad-de-la-madera-de-3-huertos-semilleros-de-progenies-de-eucalyptus-grandis.pdf.
- Marcó, M. & T. White.** 2002. Genetic parameter estimates and genetic gains for *Eucalyptus grandis* and *E. dunni* in Argentina. Forest Genetics 9(3):205-215.
- Martinez Meier, A., L. Sánchez, G. Dalla Salda, M.J. Pastorino, J.Y. Gautry, L.A. Gallo & P. Rozenberg.** 2008. Genetic control of the tree-ring response of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) to the 2003 drought and heat-wave in France. Annals of Forest Science, 65 (1). DOI: 10.1051/forest:2007074.
- Martínez-Meier, A., L. Sánchez, G. Dalla-Salda, L. Gallo, M. Pastorino & P. Rozenberg.** 2009. Ring density record of phenotypic plasticity and adaptation to drought in Douglas-fir. Forest Ecology and Management 258: 860- 867.
- Monteoliva, S., A.J. Barotto & M. Fernández.** 2015. Anatomía y densidad de la madera en *Eucalyptus*: variación interespecífica e implicancia en la resistencia al estrés abiótico. Revista de la Facultad de Agronomía de La Plata 114 (2): 209-217.
- Monteoliva, S., J.A. Barotto, P. Alarcón, N. Tesón & M. E. Fernández.** 2017. Densidad de la madera como variable integradora de la anatomía del leño: análisis de ramas y fuste en cuatro especies de *Eucalyptus*. Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata 116 (1): 1-11
- Moreno, K. & D. Irgatua.** 2015. *Eucalyptus globulus* en el sudeste de la provincia de Buenos Aires: edades, procedencias y densidad de la madera. RIA 41 (2): 143-148.
- Otegbeye, G.O. & R. C. Kellison.** 1980. Genetics of wood and bark characteristics of *Eucalyptus viminalis*. Silvae Genetica 29 (1): 27-31
- Panshin, A. & C. De Zeeuw.** 1970. Textbook of Wood technology. I. Structure, identification, uses and properties of the comercial Woods of United States and Canada, Cuarta edición. McGraw-Hill, New York. 722 páginas.
- Pathauer, P.** 2005. Capítulo III. 3. Subprograma Eucaliptos y Pinos en la región pampeana. En: Mejores árboles para más forestadores. Proyecto Forestal de Desarrollo. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca, y Alimentos: 73-94.
- Poke, F., B. Potts, R. Vaillancourt & C. A. Raymond.** 2006. genetic parameters for lignin, extractives and decay in *Eucalyptus globulus*. Annals of Forest Science (63): 813-821.
- Polge, H.** 1966. Etablissement des courbes de variations de la densité du bois par exploration densitométrique de radiographies d'échantillons prélevés à la tarière sur des arbres vivants. Application dans les domaines technologiques et physiologiques. Phdthesis, Université de Nancy. 215 páginas.
- R core team,** 2015. R: a language and environment for statistical computing. R foundation for statistical computing, Vienna, Austria. Disponible en: <http://www.r-project.org/>.
- Raymond, C.A.** 2002. Genetic of *Eucalyptus* Wood properties. Annals of Forest Science: 59: 525-531.

- Raymond, C.A., L.R. Schimleck, A. Muneri & A.J. Michell.** 2001. Genetic parameters and genotype-by-environment interactions for pulp yield predicted using near infrared reflectance analysis and pulp productivity in *Eucalyptus globulus*, Forest Genetics 8: 213-224.
- Rojas García, F. & L. Villers García.** 2005. Comparación de dos métodos para estimar la densidad de la madera de *Pinus hartwegii* Lindl. Del Volcan La Malinche. Nota técnica. Madera y bosques 11 (1): 63-71.
- Smith, D.** 1954. Maximun moistture content method por determing specific gravity of small Wood samples. Forest Products laboratory. Rept. No.2014 USDA. Forest Service. Madison, Wisconsin. EUA. 8 páginas.
- Squillance, A.E.** 1974. Average genetic correlations among offspring from open-pollinated Sorest trees. Silvae Genetic 23: 149-156.
- Tomazello, M., S. Brazolin, M.P. Chagas, J.T.P. Oliveira, A.W. Ballarin & C. Benjamin.** 2008. Application of x-ray technique in nondestructive evaluation of Eucalypt Wood. Maderas. Ciencia y tecnología 10(2): 139-149.
- Toval Hernández, G.** 2008. La mejora forestal a la luz de la mejora de *Eucalyptus globulus*. Cuad. Soc. Esp. Cienc. For. 24: 113-122. Actas de la IV Reunión sobre Genética Forestal. ISSN: 1575-2410.
- Valencia, M. S.** 1994. Variación genética de la densidad de la madraera en *Pinus patula* y su relación con la velocidad de crecimiento. Tesis de maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados Montecillo México. 108 páginas.
- Valencia, M. S. & J. Vargas Hernández.** 1997. Método empírico para estimar la densidad básica en muestras pequeñas de madera. Madera y Bosques 3(1):81-87.
- Zanne, A.E., G. López-González, D.A Coomes, J. Ilic, S. Jansen, S.L. Lewis, R.B. Miller, N.G. Swenson, M.C. Wiemann & J. Chave.** 2009. Global wood density database. Dryad. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10255/dryad.235>.
- Zobel, B & J. Talbert.** 1992. Técnicas de mejoramiento genético de árboles forestales. Ed. Limusa. México. 545 p.